

II-41

ガンマ線を用いた土壌水分量測定に関する実験

北見工業大学大学院 学生員 平 澤 陽 一
 北見工業大学工学部 正 員 佐 渡 公 明
 北見工業大学工学部 正 員 中 尾 隆 志

1. まえがき

河川流域や山地において、降水や融雪水による土壌水分量の分布、挙動を把握することことは極めて重要である。土中の水分量の分布、挙動を測定するには試料を採取しなければならないが、表層をコンクリートなどで覆われている河岸やトンネル、また試料を採取するには危険な場所などは非接触で行うリモートセンシング手法が有効であると思われる。本研究では、ガンマ線の性質を利用し非接触で土壌水分量を算出することを目的とし、今回は水分量の違う土2層の土壌水分量の測定と、土中における水の浸透状況をガンマ線を用いて測定した。

2. ガンマ線による土壌水分量測定原理

この測定方法は、ガンマ線が土粒子や水に吸収されるときに質量吸収係数の値を求めて、土壌を通過してくるガンマ線強度の減少を測定し、土壌水分量を求めようとするものである。ガンマ線強度の土壌による減衰式は土粒子、水、空気の吸収を考えて式(1)になる。

$$N = N_0 \cdot \exp(-k_s \rho_s d_s - k_w \rho_w d_w - k_a \rho_a d_a) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 d_s, d_w, d_a :土粒子、水、空気の厚さ(cm)、 N :土粒子を通過したガンマ線強度、
 k_s, k_w, k_a :土粒子、水、空気の質量吸収係数(cm^2/g)、 N_0 :線源のガンマ線強度、
 ρ_s, ρ_w, ρ_a :土粒子、水、空気の密度(g/cm^3)。

水に換算した土壌の等価厚さを d_e とすると、式(1)は、

$$N = N_0 \cdot \exp(-k_w \rho_w d_e) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$d_e = \frac{k_s \rho_s}{k_w \rho_w} d_s + d_w + \frac{k_a \rho_a}{k_w \rho_w} d_a \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで $\rho_s / \rho_w \approx 1/1000$ 、 $k_s < k_w$ であるので、線源と検出器の距離が近い場合、空気層による吸収は無視できる。ゆえに、土壌水分量を単位面積当たりの質量で求める式は、

$$\rho_w d_w = \frac{\ln N_0 - \ln N - k_s \rho_s d_s}{k_w} \equiv \frac{\ln N_0 - \ln N}{k_w} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 N_s :絶乾状態の土粒子を通過したガンマ線強度 $= N_0 \exp(-k_s \rho_s d_s)$
 また、片対数グラフで表した $\ln N$ と $\rho_w d_w$ の直線式は次式となる。

$$\ln N = -k_w \rho_w d_w + \ln N_s \quad \dots \dots \dots (5)$$

この方法はガンマ線による積雪水量の推定にも用いられている¹⁾。

3. 室内土壌水分量測定

これまでに著者らは人工ガンマ線源 Cs^{137} 、自然ガンマ線 K^{40} を用いての室内実験、野外実験を行い、土壌水分量を測定してきており、その結果、人工ガンマ線源を用いての土壌水分量測定は、ほぼ信頼できる測定結果であることが実験により確かめられてきた²⁾。今回の実験では、室内における円筒形

容器内の水分量の違う2層の土の土壌水分量を測定する実験と、円筒形容器とマイクロチューブポンプを使用し土中における水の浸透状況をガンマ線を用いて測定した。

3-1. 円筒形容器を用いた実験装置

本実験で用いた実験装置の概要を図-1に示す。実験は室内で行い、直径130cm、深さ40cmの円筒形容器②の底の中心に人工ガンマ線源Cs¹³⁷①を設置し、円筒形容器内を土粒子などの試料により満たす、この際に試料を2層に分けて容器に入れ上層と下層の間にビニールシートを敷く。Cs¹³⁷から出たガンマ線は円筒形容器内の土粒子や水に吸収されながら通過し、検出器内にあるシンチレータ④aに取り込まれたガンマ線は光電増倍管④b、増幅器⑥により増幅され、スペクトル分析器⑦によって波形分布が得られる。

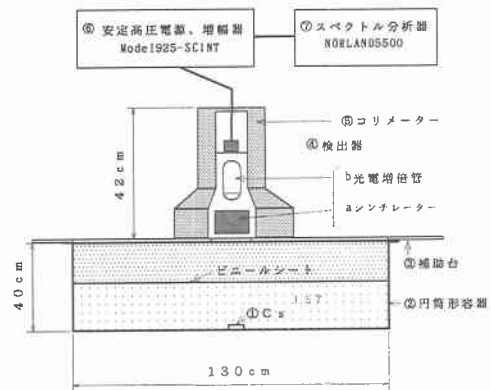


図-1 ガンマ線測定装置

3-2. 測定方法

1) 水分量の違う土2層における土壌水分量測定実験(ケース1)

人工ガンマ線源を円筒形容器の底面中央に設置し、容器内に火山灰($\rho_s=2.463\text{g/cm}^3$)を2層に分けて入れ、それぞれの層につき、断面積 67.24cm^2 、重量 3.36kg の角材で30cmの高さから自由落下により150回突き固めを行い、下層20cm、上層18cmになるよう締め固めた。下層は気乾状態とし、上層を湿潤状態にするため、2層の間にビニールシートを敷き、水が下層に入らないようにした。測定装置を図-1のようにセットし、検出器を容器の中心から半径方向に10cmごとに40cmまで移動させながら、上層が気乾状態(このときの水高さを0cmとする)の場合のガンマ線強度と、上層に水 82.52kg を一様にまいた後の湿潤状態の場合のガンマ線強度をそれぞれ測定時間10分で測定した。この測定より得られた波形分布からCs¹³⁷におけるピーク曲線の立ち上がり(330CH、607KeV)から終わり(405CH、745keV)までにおける総カウント数をガンマ線強度Nとする。これにより求められたNと、過去に著者ら³⁾により求められた土粒子の質量吸収係数($K_s=0.0701\text{ cm}^2/\text{g}$)、水の質量吸収係数($K_w=0.0808\text{ cm}^2/\text{g}$)により水に換算した土壌の等価厚さ d_e を求め、上層が湿潤状態と気乾状態の場合の d_e の差より上層の水分量を水高さ d_w として求める。

2) 土中における水の浸透実験(ケース2)

円筒形容器の下層に火山灰を入れ、締め固めをして20cmの高さにし、下層の上面中央に人工ガンマ線源を設置した。その上にビニールシートを敷き、マイクロチューブポンプにつながっているチューブをシートの中央にパテで固定して、人工線源のすぐ上から水が上層に注入されるようにした。その上に上層の火山灰を入れ締め固めた。注水していない状態でガンマ線強度を測定し、その後3時間注水を行った直後に再びガンマ線強度測定を行った。以後これを繰り返し、注水時間にして24時間、水の総注入量 71.87kg になるまで実験を行った。ガンマ線強度の測定方法は、測定時間10分、検出器を容器中心から左右半径方向に40cmまで、10cmごとに移動させながら測定し、ケース1と同様にガンマ線強度Nから水高さ d_w を求めた。

3-3. 測定結果と検討

今回行った実験の結果を表-1~3に示す。表-1はケース1の実験結果であり、検出器を0~40cmまで移動させたときのガンマ線強度の平均値Nと、水高さを示したものである。ここでのガンマ線強度Nは3回ずつガンマ線強度測定を行った結果の平均値である。

表-1 ケース1の γ 線強度Nと水高さ d_w

中心からの距離(cm)	上層に水を入れる前		上層に水を入れた後	
	γ 線強度N	水高さ(cm)	γ 線強度N	水高さ(cm)
0	30358	0.0	19191	5.68
10	28704	0.0	17596	5.88
20	19493	0.0	11804	5.58
30	19802	0.0	6018	5.84
40	5175	0.0	3067	4.63

表-2 ケース2における γ 線強度から求めた水高さ d_w (cm)と γ 線強度N(Counts-10min)

中心からの距離(cm)	注 水 時 間																	
	0 hr		3 hr		6 hr		9 hr		12 hr		15 hr		18 hr		21 hr		24 hr	
	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w	N	d_w
-40	11389	0.0	7613	3.56	6626	4.79	5977	5.71	6147	5.46	6117	5.50	5944	5.75	5802	5.97	5621	6.25
-30	36633	0.0	24091	4.18	20371	5.85	18611	6.76	19337	6.37	19420	6.33	19558	6.26	19170	6.46	18694	6.71
-20	113866	0.0	79643	3.97	70440	5.34	68568	5.64	68340	5.67	68111	5.71	68897	5.58	67478	5.82	66837	5.92
-10	298407	0.0	208607	4.30	190791	5.38	192295	5.28	188664	5.51	190744	5.38	194272	5.16	188406	5.53	188567	5.52
0	420908	0.0	318481	3.45	290593	4.59	293940	4.44	287469	4.72	292664	4.50	303730	4.04	295813	4.36	289178	4.65
10	325056	0.0	219620	4.71	202786	5.67	203683	5.62	203914	5.60	206125	5.47	206380	5.46	204716	5.56	201961	5.72
20	135199	0.0	90555	4.45	80196	5.80	79609	5.89	80366	5.78	81012	5.69	79389	5.92	80222	5.80	79802	5.86
30	42715	0.0	28308	4.10	24278	5.64	23696	5.88	23642	5.90	24361	5.60	23766	5.85	23766	5.85	23202	6.09
40	12930	0.0	8266	3.96	6711	5.80	6708	5.81	6396	6.23	6539	6.03	6565	6.00	6473	6.12	6206	6.50

表-2はケース2の実験結果である。無注水から注水時間24時間までのガンマ線強度とそれから算出した水高さ d_w の値である。表-3はケース2の実験終了後、実際に円筒形容器内上層の土を採取したデータで、それぞれの距離で人工ガンマ線源から検出器まで、ガンマ線透過経路の土を採取して得られた結果である。

表-3 ケース2の実験終了後の採取試料データ

中心からの距離	間隙率 n(%)	飽和度 Sr(%)	体積含水率 Mv(%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	水高さ d_w (cm)
-40	69.65	50.94	35.48	0.75	6.67
-30	69.99	48.27	33.78	0.74	5.01
-20	62.52	72.01	45.02	0.92	7.19
-10	64.36	65.87	42.39	0.88	6.47
0	65.87	65.44	43.11	0.84	6.21
10	67.34	59.89	40.33	0.80	6.22
20	64.04	65.36	41.85	0.88	5.71
30	65.19	63.05	41.10	0.86	7.19
40	65.26	60.96	39.78	0.85	7.22

ケース1の実験結果より求められた水高さ d_w と、実際に円筒形容器内に入れた水の量から求めた水高さを比較したものが図-2である。この図中の中心からの距離とは、測定器が人工ガンマ線源の鉛直上にある状態を0cmとし、半径方向に測った距離である。注水総重量は82.52kgであり、これを円筒形容器内に入れたときの水高さは6.22cmになる。この6.22cmにガンマ線強度による水高さが近づくほど理想的な実験結果であるといえる。ここで水高さを比較だが、この注水量から求めた水高さに対して、ガンマ線強度から求めた水高さが一様に低くなっている。低くなった原因は、ガンマ線強度のばらつきが考えられる。ガンマ線強度から求められた水高さのうち、他とは大きく違いを見せている40cmを除き、0から30cmまでの水高さの平均は5.75cmであり、誤差にして0.47cm(相対誤差7.56%)という結果である。

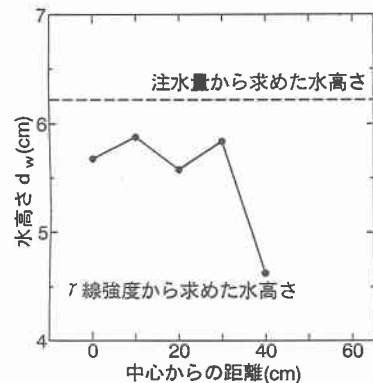


図-2 ケース1の水高さの比較

図-3はケース2の注水ごとに測定したガンマ線強度より求めた水高さ(表-2)を図にしたものである。ここでの中心からの距離とは、容器中心より右方向が“+”,左方向が“-”である。数カ所て交差している部分が見られるが、この図から中心付近の空隙は早い時間に水で満たされていき、その後外側に水が浸透していく様子が見られる。

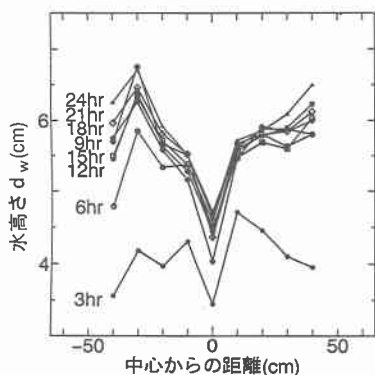


図-3 ケース2の実験結果

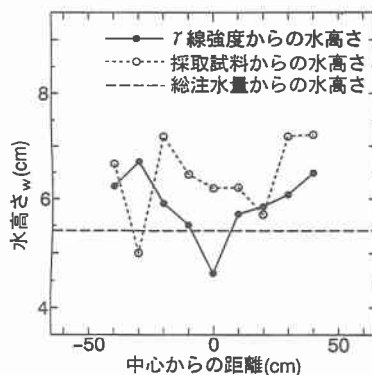


図-4 ケース2の水高さの比較

図-4はケース2の最後の注水(注水時間24hr)が終わった後のガンマ線強度より求めた水高さ、その測定終了後採取した試料から求めた水高さ(表-3)、容器内に入れた水の総注水量(71.78kg)より求めた水高さ(5.41cm)を図に表したものである。ガンマ線強度からと採取試料からの水高さを比較すると、中心からの距離で20cmと-30cmを除けば、似た傾向を示している。また、ガンマ線強度から求めた水高さの平均は5.91cm、採取試料から求めた水高さの平均は6.43cmであり、誤差は0.52cm(相対誤差8.09%)となった。ここで誤差の原因は、各点での採取試料が1本ずつしか取れなかったことによる誤差、およびガンマ線強度の測定誤差だと思われる。

4. 結論

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ケース1の実験より、水分量の違う土2層においてガンマ線強度測定を行い、上層の土に含まれる水分量の推定の結果、平均水高さにして5.75cm、容器内に注水した水高さとの誤差は0.47cm(相対誤差7.56%)となった。
- 2) ケース2の水の浸透実験より、円筒形容器中央から水を浸透させ、3時間ごとのガンマ線強度測定を行った結果、多少のばらつきはみられるものの、浸透状況を把握することができた。また、ガンマ線強度測定後試料を採取し、水高さの比較を行った結果、平均値にして0.52cm(相対誤差8.09%)の誤差が求められた。
- 3) ケース1、ケース2の実験結果における誤差の原因を確かめることはできなかったが、ガンマ線強度測定時の測定誤差および試料採取のサンプリング数が少なかったことによる誤差によるものではないかと思われる。

以上のことより、ケース2の実験において、ガンマ線強度測定より水の浸透状況を推定することは可能であるといえる。

<参考文献>

- 1) Elmer L. Offenbacher and Samuel C. Colbeck: Remote Sensing of Snow Covers Using the Gamma-ray Technique, CRREL REPORT 91-9, pp.18, 1991.
- 2) 中野誠二郎、佐渡公明、中尾隆志、海老江邦雄: ガンマ線を用いた土壌水分量測定の可能性について、土木学会北海道支部論文報告集, p.2-5, 1995.
- 3) 中野誠二郎、佐渡公明、中尾隆志、海老江邦雄: ガンマ線を用いた土壌水分量に関する基礎的研究、水文・水資源学会1994年度研究発表会要項集, p.82-83, 1994.